

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25450254

研究課題名(和文)木質複合材料実大材のクリープ破壊に及ぼす水分の影響の解明と予測

研究課題名(英文)Effect of moisture on creep fracture of full scale wooden structural materials

研究代表者

中島 史郎(Nakajima, Shiro)

宇都宮大学・地域デザイン科学部・教授

研究者番号：00344010

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：木質材料の実大材のクリープ破壊に水分作用が及ぼす影響を明らかにすることを目的として、恒湿環境下と湿度変動環境下において製材と構造用単板積層材の実大材に対して長期間継続荷重載荷試験を行った。また、材を要素に分割し、各要素を粘弾性体としてモデル化し、材がクリープ破壊に至る過程をコンピュータシミュレーションにより予測した。

湿度変動環境下において材がクリープ破壊に至る時間は、恒湿環境下において材がクリープ破壊に至る時間よりも短くなることを確認した。また、提案する手法によりクリープ破壊に至る過程を概ね予測することができることを確認した。ただし、クリープ破壊時間の絶対値の予測については課題を残した。

研究成果の概要(英文)：The effect of the moisture on the creep fracture of full scale lumbers and full scale laminated veneer lumbers were clarified through the test results of the long term loading tests. The long term loading test was conducted in two different climates, the climate of the standard condition and the dry and humid cyclic climate. The creep fracture and the duration of time to failure was estimated by modeling the test specimens as small elements of viscoelastic materials.

Common to the both materials the duration of time to failure was shorter and the deformation was larger for the test specimens tested in the dry and humid cyclic climate. The test results were well estimated by the proposed model. Though the absolute deformation was not well estimated and this is an agenda for future research works.

研究分野：木質構造

キーワード：クリープ破壊 クリープ変形 製材 構造用単板積層材 実大材 標準状態 湿度変動環境下 粘弾性モデル

1. 研究開始当初の背景

木造建築物の構造体を構成する横架材に長期間、継続的に荷重（以下、「長期継続荷重」と呼ぶ）が作用し続けると、たとえその荷重の大きさが横架材の曲げ耐力よりも小さな値であっても、材の中で微視的な破壊が徐々に進行し、この微視的な破壊の蓄積量が一定レベルを超えた時点で材が破壊することが一般に知られている。この現象は一般に「クリープ破壊」と呼ばれている。

無垢の木材のクリープ破壊については、過去に多くの研究実績<sup>1)</sup>があり、一定の知見が得られている。しかしながら、近年、木造建築物の構造材料として多用されている集成材、単板積層材などの木質複合材料についてはクリープ破壊に関する既往の研究が少なく、明らかになっていない点が多い。

一方、木造建築物の構造躯体は様々な温湿度環境下にさらされるが、木質複合材料は挽き板や単板などのエレメントを接着して製造しているため、無垢の木材以上に水分による影響を受けやすい。しかしながら、木質複合材料のクリープ破壊に関しては既往の研究が少ないため、木質複合材料のクリープ破壊性状に及ぼす水分の影響については未だ明らかになっていない点が多い。

さらに、木材のクリープ破壊のメカニズムについては、幾つかのモデル化<sup>2)</sup>が行われているが、温湿度変動環境下における木質複合材料のクリープ破壊のメカニズムについては、モデル化が行われていない。このため新しく開発された木質複合材料の長期許容応力度を算定する際には、幾つかの荷重レベルにおいて長期的に荷重を載荷して材が破壊するまでの時間を気長に計測するという膨大な手間と時間を要する試験を行う必要がある（写真1参照）。仮に実大の木質複合材料のクリープ破壊現象をモデル化することができれば、計算によりクリープ破壊を予測することが可能となり、試験に係るコストやエネルギー、手間を著しく軽減することができる。

木材及び木質複合材料の小試験体（断面寸



写真1 木質I型複合梁の長期継続荷重載荷試験の様子。（建築研究所にて）  
 (解説)一番手前の試験体がクリープ破壊している。試験は恒温恒湿環境下で実施。全試験に要した期間は約2年。

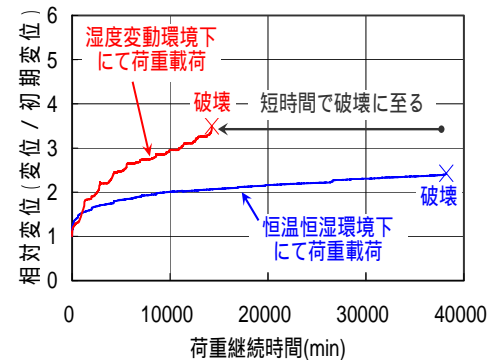
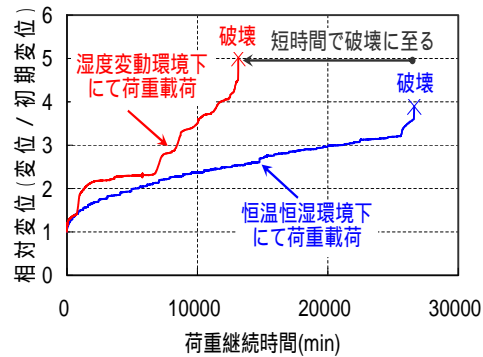


図1 木材小試験体(上図)とパーティクルボード小試験体(下図)の長期継続荷重載荷時における時間経過に伴う変形の増大を示したグラフ。

(解説)湿度の変動があると変形が大きく増大し(図中の赤い線)、湿度変動がない場合(図中の青い線)に比べて早く材が破壊に至る。湿度変動の影響はパーティクルボード(下図)の方が大きい。

法 20×20mm, 長さ 420mm) については、恒温恒湿環境下(温度 20・相対湿度 65%の定常環境)と湿度変動環境下(温度 20・相対湿度 65%と温度 20・相対湿度 90%の交替繰り返し環境)において長期継続荷重を載荷する実験が行われており、クリープ破壊に及ぼす水分作用の影響について、以下のことが確認されている<sup>3)</sup>。

- 1) クリープ破壊に至るまでの時間は、湿度変動環境下の方が恒温恒湿環境下よりも短い。すなわち、湿度変動環境下にある試験体の方が短時間でクリープ破壊する。(図1参照)
- 2) クリープ破壊に至るまでの時間に及ぼす水分作用の影響は、木質複合材料の方が無垢の木材よりも大きい。(図1参照)
- 3) 小試験体をバネとダッシュポットからなる弾塑性体要素の集合体としてモデル化し、所定の変位に達した要素が順次破壊していくというモデルを用いることによって、水分作用を受ける小試験体のクリープ破壊現象を概ね予測することができる。

一方で、湿度変動に伴う材内の水分変動は、一般に材の表面から材の中心に向かって徐々に進行する。したがって、断面の大きい

実大材は、小試験体よりも水分作用の影響を受けにくい可能性が高いが、実大の木質複合材料のクリープ破壊に及ぼす水分作用の影響に関する知見は得られていない。

【文献】

- 1) Wood L.W.: Relation of Strength of Wood Duration of Load, F.P.L. Report No.R1916, 1951.
- 2) Gerhards C.C. Time-related effects on wood strength: a linear-cumulative damage theory, Wood Science, Vol.11, No.3, pp.139-144, 1979.
- 3) 中島史郎, 山口修由, 中川貴文: “木質構造材料の荷重継続時間の調整係数に及ぼす使用環境の影響に関する考察”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.671-672, 2012.

## 2. 研究の目的

本研究では、実大の木質複合材料のクリープ破壊に及ぼす水分作用の影響を明らかにすることを目的として、湿度変動環境下において実大の木質複合材料に対して長期継続荷重を載荷する実験を行い、クリープ破壊に至る状況が材の水分状態によってどのように異なるかを確認した。また、水分作用を受ける実大の木質複合材料がクリープ破壊に至る過程を推定する理論について、検討した。

なお、本研究で研究対象とする「実大の木質複合材料」は、木造建築物の構造材として使用する材と同程度の断面寸法を有する木質複合材料とした。

## 3. 研究の方法

研究は以下に示す実験を主体とする研究(項目A)と解析を主体とする研究(項目B)により構成される。以下、その内容について記す。

### A. 長期継続荷重載荷試験の実施

#### (1) 概要

実大の製材(スギ材)と実大の木質複合材料(構造用単板積層材)について長期継続荷重載荷試験を行い、荷重載荷後からクリープ破壊が生じるまで時間を計測した。載荷した荷重の大きさは、曲げ耐力の90%、80%、70%とし、標準状態と湿度変動環境下の2つの環境下でそれぞれ試験を行った。

#### (2) 研究方法の詳細

標準状態における長期継続荷重載荷試験

- (1) 試験体(スギ製材(寸法: 105×105×2200mm)120体, スギ構造用単板積層材(寸法: 105×105×2200mm)120体)を作成し、両材料について以下の(2)から(5)を行った。
- (2) 全数曲げ弾性係数を測定し、曲げ弾性係数の分布がほぼ等しい試験体60体ずつ

からなる2つのグループを作成した(以下、2つのグループを「グループA」「グループB」と呼ぶ)。

- (3) (2)において作成したグループAに含まれる試験体について、全数曲げ試験を行い、最大曲げ耐力を求めた。
- (4) (2)において作成したグループBに含まれる試験体について、(3)において求めた最大曲げ耐力の90%、80%、70%の荷重レベルにおいて長期継続荷重載荷試験を行った。試験体数は各荷重レベル6~10体とした。また、試験を行う環境は標準状態とした。
- (5) 試験体が破壊するまでの時間を計測した。

湿度変動環境下における長期継続荷重載荷試験

- (1) 両材料について、(2)において作成したグループBに含まれる試験体について、(3)において求めた最大曲げ耐力の90%、80%、70%の荷重レベルにおいて長期継続荷重載荷試験を行った。試験体数は各荷重レベル6~10体とした。試験を行う環境は、以下の温湿度条件とした。

温湿度条件:

Step1→Step2→Step3→Step4→(以下、同じ行程を繰り返す)

ただし、

Step1: 20 °C, RH65%(70時間),

Step2: 20 °C, RH65%→20 °C, RH90%(2時間),

Step3: 20 °C, RH90%(70時間), Step4: 20 °C, RH90%→20 °C, RH65%(2時間)

写真2に長期継続荷重載荷試験の様子を示す。標準状態に設定した養生室と上記の温湿度変動を設定した養生室にて長期継続荷重載荷試験を行った。

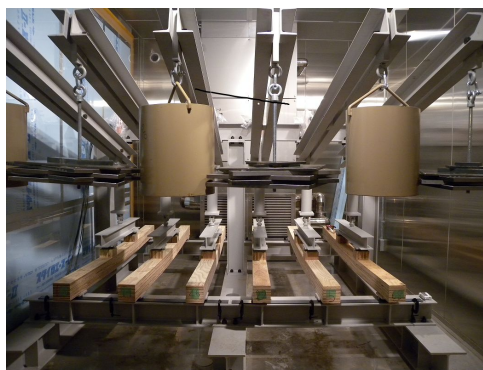


写真2 長期継続荷重載荷試験の様子  
(解説)湿度変動環境下において試験を行っている様子。試験体はスギ構造用単板積層材であり、荷重比は70%である。

### B. クリープ破壊現象の予測

#### (1) 概要

粘弾性モデルを用いた、クリープ破壊現象

に対するモデルを提案した。また、提案したモデルに対してコンピュータシミュレーションを行い、水分作用を受ける製材と木質複合材料の実大材がクリープ破壊に至る過程を予測した。Aにおいて得られた実験結果と比較し、モデルの妥当性を確認した。

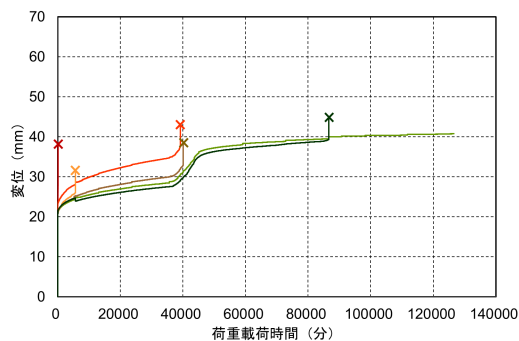
(2) 研究方法の詳細

- (1) 木材等の力学的な特性のモデル化に一般的に使われる粘弾性モデルを用いて、材を構成する要素がクリープ破壊に至る現象をモデル化した。
- (2) (1)において作成した要素に対するモデルを用いて、材全体をモデル化し、要素のクリープ破壊が蓄積して、最終的に材がクリープ破壊に至る過程をコンピュータシミュレーションにより予測した。

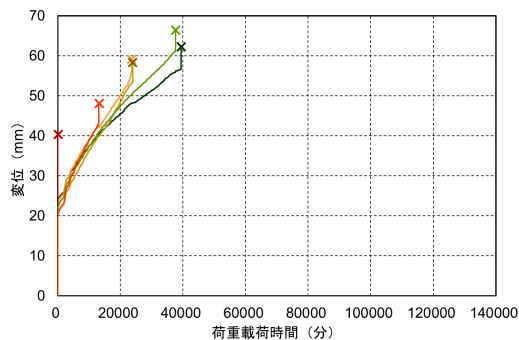
4. 研究成果

(1) クリープ破壊に至る時間

図2に荷重比が中間となる荷重比 80%にて長期荷重載荷試験を行った試験体(構造用単板積層材)の変位と荷重継続時間との関係を示す。図2(a)は標準状態において試験を行った結果であり、図2(b)は湿度変動環境下において行った試験の結果である。



(a) 恒温恒湿環境下(標準状態)



(b) 湿度変動環境下

図2 変位と荷重継続時間との関係(クリープ曲線)

(解説)湿度変動環境下において試験を行った場合の方が、試験体が破壊に至る時間が短く、さらに、試験体の変位(変形)量が大きい。

湿度変動が実大材の木質材料のクリープ破壊に及ぼす影響として以下のことが明らかになった。

- 1) 湿度変動環境下においてクリープ破壊に至る時間は、標準状態においてクリープ破壊に至る時間の約 1/2 となる。
- 2) クリープ破壊が生じたときの試験体の変位は、標準状態において試験を行った試験体が約 30~40mm であったのに対して、湿度変動環境下において試験を行った試験体は約 50~60mm となる。すなわち、クリープ破壊時における変形量は、標準状態において長期荷重載荷試験を行った場合よりも、湿度変動環境下において長期荷重載荷試験を行った場合の方が大きくなる。

また、図3に図2(b)(湿度変動環境下において行った試験の結果)の横軸(時間軸)の最大値を小さくし、変位-時間曲線を拡大したものを示す。同図より以下のことを確認することができた。

- 3) 湿度変動環境下における試験体の変位は、乾燥過程(高湿度から低湿度の湿度が変わる過程)において著しく増大する。

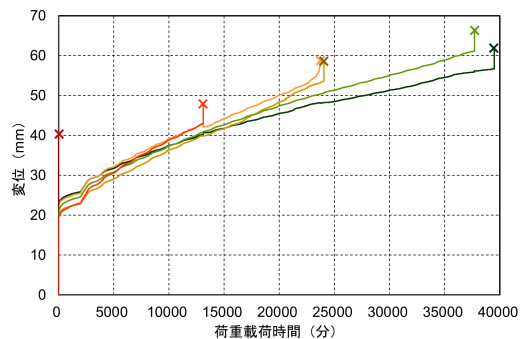


図3 湿度変動環境下において長期継続荷重載荷試験を行った試験体の変位と時間との関係

(解説)図は構造用単板積層材を荷重比 80%にて荷重した結果。図中のXは試験体が破壊したことを示す。湿度変化のため曲線は波打っている。

(2) 荷重継続時間の調整係数

表1に恒温恒湿環境下(標準状態)及び湿度変動環境下において行った長期継続荷重載荷試験により得られた荷重継続時間の調整係数を示す。同表に示す結果は図4に示す縦軸を荷重比、横軸を荷重継続時間(分)の常用対数とするグラフから求めたものである。同図に示す2つの回帰式のxに50年を分に換算した値の常用対数(7.42)を代入して得られた荷重比yを求め、得られたyの値を100で除した値を荷重継続時間の調整係数としている。

荷重継続時間の調整係数は恒温恒湿環境下において試験を行った場合は0.53であり、湿度変動環境下において試験を行った場合は0.48であった。湿度変動する環境下では、恒温恒湿環境下よりも木質材料はクリープ破壊に至る時間が短くなることが確認された。

なお、既往の研究<sup>1)</sup>では、製材（無欠点小試験体）について、荷重比とクリープ破壊に至る時間が図4の黒実線のように求められている。黒実線（Madison Curve）と実大材について得られた試験結果はその特性が異なっており、実大材と無欠点小試験体はクリープ破壊に対して異なる性状を示す可能性が高いことを確認した。

表1 荷重計測時間の調整係数

試験環境	荷重継続時間の調整係数
恒温恒湿環境	0.53
湿度変動環境	0.48

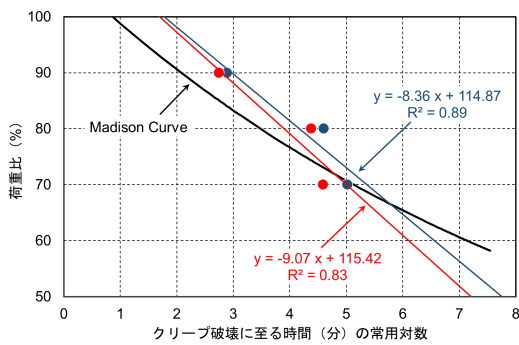


図4 荷重比とクリープ破壊に至る時間との関係

(解説) は恒温恒湿環境下において試験を行った結果であり、 は湿度変動下において試験を行った結果である。図中の黒線は既往<sup>1)</sup>の研究により得られている木材の無欠点小試験体の荷重比とクリープ破壊に至る時間との関係（Madison Curve）を示したものである。

### (3) クリープ破壊現象の予測

#### 1) モデル化とシミュレーションの方法

図5に示すように長期継続荷重載荷試験に供した試験体を100の要素に分割し、各要素

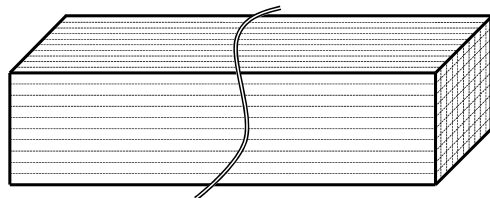


図5 試験体のモデル化

(解説) 試験体の断面を10×10の計100の部分に分割し、試験体と長さが等しく、断面積が1/100となる要素に分割した。各要素に生じるひずみ量を計算により求め、各要素についてひずみが一定の値に達した時点をもってその要素は荷重を負担しないものとして、応力を再配分し、試験体が破壊に至る過程を予測した。

素を粘弾性体としてモデル化した。また、各

要素に生じるひずみ量は、図6に示す粘弾性モデルを用いて算定した。

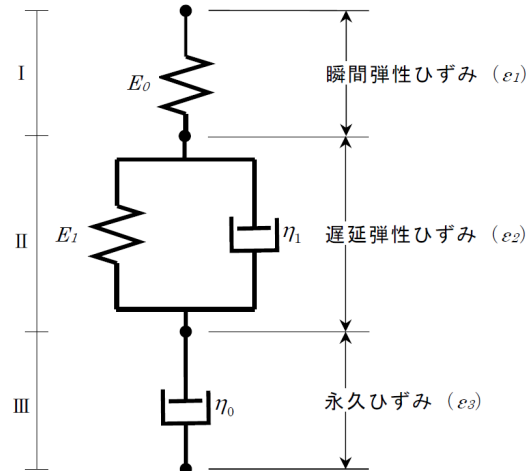


図6 粘弾性モデル

(解説) 一般化フックとモデルを用いて要素をモデル化した。粘弾性モデルでは要素の変形を、瞬間弾性変形をする部分( )、遅延弾性変形をする部分( )、永久変形をする部分( )により構成されるものとした。また、要素のひずみは、瞬間弾性ひずみ、遅延弾性ひずみ、永久ひずみを合わせたものとした。

粘弾性モデルは、一般化フックとモデルとし、図6に示すように、要素のひずみは、瞬間弾性ひずみ(  $\epsilon_1$  )、遅延弾性ひずみ(  $\epsilon_2$  )、永久ひずみ(  $\epsilon_3$  )を合計したものとした。

試験体に作用する荷重量が定めれば、各要素に生じる応力を求めることができる。ある要素に生じる応力を  $\sigma_0$  とすると瞬間弾性ひずみ(  $\epsilon_1$  )、遅延弾性ひずみ(  $\epsilon_2$  )、永久ひずみ(  $\epsilon_3$  )はそれぞれ、式(1)、式(2)、式(3)により求まる。

$$\epsilon_1(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} \dots \dots \text{式(1)}$$

$$\epsilon_2(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) \dots \dots \text{式(2)}$$

$$\epsilon_3(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t \dots \dots \text{式(3)}$$

ここで、  $E_0$  は瞬間弾性変形する部分の弾性係数

$E_1$  は遅延弾性変形する部分の弾性係数

$\eta_0$  は永久変形する部分の粘性係数

$\eta_1$  は遅延弾性変形する部分の粘性係数

$t$  は荷重継続時間

瞬間弾性ひずみ(  $\epsilon_1$  )、遅延弾性ひずみ(  $\epsilon_2$  )、永久ひずみ(  $\epsilon_3$  )を合算したひずみが式(4)より求めたひずみ量(  $\epsilon$  )に達した時点をもつ

て、その要素は存在しなくなったこととし、応力を残った要素に再配分して、各要素に生じるひずみ量を再計算した。この計算を繰り返し、試験体が荷重を負担することができなくなる時間を求めた。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots \text{式(4)}$$

ここで、 $E$  は各環境条件下における要素の弾性係数

$\sigma$  は要素が負担できる最大応力

$\varepsilon$  は要素が変形できる最大ひずみ

## 2) クリープ破壊現象の予測結果

長期継続荷重が作用する試験体の変形と破壊を推定した結果を図7に示す。同図には、恒温恒湿環境下における試験体の変形と破壊の推定結果（青線）と湿度変動下における試験体の変形と破壊の推定結果（赤線）を示す。なお、各要素の弾性係数と粘性係数は、断面方向の水分分布変動の測定により得られた含水率の値を考慮して定めている。

推定した各環境下における試験体の変形状態並びに破壊に至る時間の傾向は、実験結果（図2）と概ね同じとなっており、前述のモデル化とシミュレーションにより、恒温恒湿環境下（標準状態）と湿度変動下における実大の木質材料のクリープ変形とクリープ破壊の傾向を概ね推定することができることを確認した。

一方、破壊に至る時間については、推定値は実験値の約半分と求まった。粘弾性モデルに用いた試験体の各特性値（弾性係数と粘性係数）には既往の文献値を用いているが、含水率が変動する木質材料の弾性係数及び粘性係数に関する既往の知見はない。このため、解析に用いた弾性係数と粘性係数の値が必ずしも妥当な値ではなかった可能性がある。含水率が変動する木質材料の弾性係数及び粘性係数に関する知見を実験等を行い、蓄積することが今後の課題として残された。

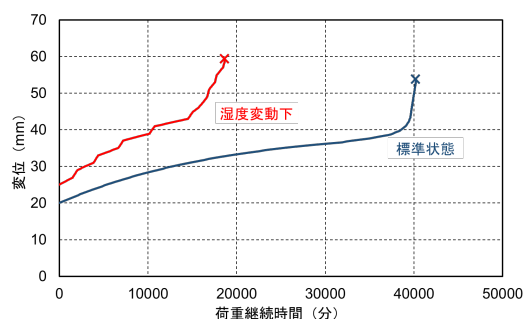


図7 変位と荷重継続時間との関係(クリープ曲線)の推定結果

(解説)青線は恒温恒湿環境下(標準状態)にある材に対する推定結果であり、赤線は湿度変動下にある材に対する推定結果である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計1件)

松本悠杜, 中島史郎: “クリープ関数の分析に基づく木質構造材料のクリープ限度の推定法に関する研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 75-76, 2016.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

中島 史郎 (NAKAJIMA SHIRO)

独立行政法人建築研究所・建築生産研究グループ・上席研究員(平成26年度まで)  
国立大学法人宇都宮大学・地域デザイン科学部建築都市デザイン学科・教授(平成27年度以降)

研究者番号: 00344010

(2)研究分担者

中川 貴文 (NAKAGAWA TAKAFUMI)

国土交通省国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官

研究者番号: 60414968